

CONTROL DE LAS TENSIONES RESIDUALES COMO HERRAMIENTA DE MEJORA DE LOS ALAMBRES DE PRETENSADO: 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES

J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervías, M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,
28040 Madrid, España.
E-mail: jmatienza@mater.upm.es

RESUMEN

En este artículo se resume el trabajo desarrollado por los autores durante estos últimos años para mejorar el comportamiento de las armaduras activas del hormigón pretensado mediante el control de sus tensiones residuales. En esta primera parte se examinan las técnicas de caracterización de dichas tensiones, sus dificultades y limitaciones, así como la interpretación de sus resultados. Se han realizado medidas de tensiones residuales con diferentes tratamientos, utilizando difracción de rayos X, de neutrones y de radiación sincrotrón. Asimismo se han realizado simulaciones numéricas. Las microestructura de los alambres de pretensado (finas láminas de ferrita y cementita muy deformadas y alineadas según la dirección de trefilado) complican de forma importante la obtención de un perfil de tensiones residuales en estos alambres.

ABSTRACT

This paper summarizes the work done by the authors during the last years in attempting to obtain accurate measurements and simulations of the residual stresses developed in prestressed concrete wires in order to improve their performance. In this first part of the study, the characterization of the residual stress distributions is examined: residual stresses in cold-drawn wires (subjected to different treatments) have been measured by neutron, synchrotron and X-ray diffraction and also, numerical simulations have been performed. Severe plastic deformation, anisotropy and the presence of cementite make experimental measurements and simulations in this kind of wires a difficult task. Experimental and numerical difficulties, limitations of different techniques and interpretation of the measurements have been discussed.

PALABRAS CLAVE: Armaduras Activas, Acero de Pretensado, Acero Perlítico, Tensiones Residuales.

1. INTRODUCCIÓN

El alambre de acero eutectoide es el material empleado en las armaduras activas del hormigón pretensado, en los cables de la minería y de la industria pesquera y, como hilos muy finos, en la industria del automóvil para el refuerzo de neumáticos. Estos alambres se obtienen mediante una técnica de conformado llamada trefilado, que consiste esencialmente en reducir las dimensiones de una barra por estirado en frío al hacerla pasar a través de unas matrices cónicas (hileras). El trefilado genera cambios importantes en la microestructura de los alambres (formada por finas láminas de ferrita y cementita), provocando una alineación de las láminas según la dirección de trefilado, una reducción del espaciado interlaminar y la aparición de una acusada textura. Como resultado de ello, el alambre final se puede definir como un material nanolaminado que alcanza una elevada resistencia mecánica, a la vez que mantiene una ductilidad y tenacidad aceptables.

Uno de los problemas aún no resuelto satisfactoriamente es la eliminación de las tensiones residuales producidas durante el trefilado. En este proceso los alambres sufren una gran deformación

plástica que no es completamente homogénea en toda la sección, lo que origina la aparición de un perfil de tensiones residuales en el producto final, con compresiones en el centro y tracciones en la superficie [1]. Desde hace tiempo se sabe que la presencia de tensiones residuales en alambres trefilados influye en su acritud y propensión a la rotura frágil [2], disminuyendo la vida en fatiga [3] y aumentando la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión [4]. Los fabricantes conocen estos efectos dañinos y tratan de paliarlos mediante tratamientos posteriores al trefilado.

Parece, por tanto, que el control de dichas tensiones podría ser una herramienta básica para la mejora de las propiedades de los alambres. El inconveniente es que la caracterización de las tensiones residuales en esta clase de alambres sigue siendo una tarea muy complicada. En este artículo se resume el trabajo desarrollado por los autores durante estos últimos años para medir, entender y modificar las tensiones residuales con el objetivo de mejorar el comportamiento de los alambres de acero trefilado. En esta primera parte se examinan las técnicas de caracterización de dichas tensiones, sus dificultades y limitaciones, así como la interpretación de sus resultados.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN ALAMBRES DE ACERO PERLÍTICO TREFILADO

2.1.- Principales técnicas de medida experimental

Las tensiones residuales se pueden definir como el estado de tensiones internas autoequilibradas que existe en cuerpos libres de fuerzas exteriores o restricciones actuando en su contorno [5]. En la actualidad hay disponibles un considerable número de técnicas experimentales para la medida de las tensiones residuales, que fundamentalmente se pueden clasificar en dos grupos [6]:

- Métodos mecánicos: Suelen medir la deformación elástica recuperada al producirse una relajación de las tensiones por la eliminación de parte del material. En el caso de la industria de los alambres, el método más importante es la medida de la curvatura por una eliminación de capas superficiales. Para la obtención de los valores de las tensiones en profundidad es necesario asumir como hipótesis una forma del perfil de tensiones, pero en la práctica únicamente se miden tensiones cercanas a la superficie. En general este tipo de técnicas sirven como evaluación cualitativa y control de calidad en la industria.

- Métodos de difracción: La medida de tensiones residuales por difracción está basada en la Ley de Bragg[5], que relaciona la distancia interplanar correspondiente a una familia de planos (hkl) con el ángulo de difracción producido por la reflexión para un valor dado de la longitud de onda incidente. Las deformaciones y tensiones residuales se calculan entonces relacionando la distancia interplanar medida con el valor de referencia sin tensiones d_0 [5]. Las medidas por difracción se pueden realizar en tres tipos de instalaciones:

- Difractómetros de Rayos X convencionales: existentes ya en muchos laboratorios de investigación, tienen el inconveniente de que sólo permiten obtener información de la zona superficial del material.

- Difractómetros de Neutrones: Cuentan con la ventaja de que son capaces de penetrar en el material, con lo que permiten medir tensiones residuales en profundidad, dando información de lo que sucede en un diámetro completo de los alambres.

- Sincrotrón: son Rayos X de alta intensidad (en torno a 1 millón de veces más intensos que los convencionales). La información obtenida es comparable con la de los neutrones, bajo ciertas condiciones.

Los métodos de difracción se han convertido en los más importantes y prometedores para la medida de tensiones residuales en materiales cristalinos. Entre sus ventajas destacan que tienen una alta resolución y precisión, son no destructivos y permiten conocer las tensiones residuales en cada fase de un material polifásico. Además, en muchos difractómetros ya se dispone de máquinas de tracción acopladas que permiten la medida de tensión simultánea a una carga aplicada a la muestra.

2.2.- Acero Perlítico Trefilado: Un material difícil de medir por difracción

La microestructura de los alambres de pretensado, formada por finas láminas de ferrita y cementita, complica significativamente la medida de tensiones residuales por técnicas de difracción, debido fundamentalmente a las siguientes razones:

1.- Tensiones residuales en la cementita: El principal problema para obtener las tensiones residuales en la perlita es la práctica imposibilidad de medir por difracción las tensiones en la fase cementita. Con los métodos de difracción se miden las tensiones residuales en cada una de las fases de un material polifásico. En el caso de la perlita, habría que medir por separado las tensiones en la fase ferrita y en la cementita. Para obtener las macrotensiones se utiliza la regla de las mezclas con las fracciones volumétricas de cada fase:

$$\sigma^{\text{Macro}}(r) = (1-f) \sigma^{\text{fe}} + f \sigma^{\text{c}} \quad (\text{I})$$

Siendo σ^{fe} y σ^{c} las tensiones residuales medidas para la ferrita y la cementita y f la fracción volumétrica de cementita, que suele estar en torno al 10%. El problema es que la pequeña fracción de volumen que ocupa la cementita así como su estructura ortorrómbica (con muy pocas simetrías) hacen muy complicado obtener información de sus picos de difracción (difícilmente distinguibles del ruido de fondo), aunque se utilicen tiempos de exposición más largos y mayores volúmenes de medida. Además, la mayoría de sus picos más intensos se solapan con los de la ferrita.

2.- La d_0 en la ferrita: No es difícil medir el espaciado laminar en la fase ferrita (normalmente se emplean los planos (110) y (211) que tienen picos de difracción de gran intensidad y fácilmente medibles). El problema es que para obtener las tensiones en la ferrita es necesario utilizar un valor de comparación d_0 , espaciado de referencia que representa el espaciado interplanar de la ferrita sin tensiones residuales.

La determinación de este parámetro no es un problema trivial, porque para obtener valores de deformaciones y tensiones con errores aceptables, el error en d_0 debe ser menor que el 0,01% de su valor real [5,7]. Los métodos tradicionales para obtener este valor están basados en la relajación de las tensiones residuales bien sea utilizando polvos de hierro, cortando pequeños cupones del material real o utilizando tratamientos térmicos de recocido. El problema es que con estos métodos se consigue relajar las macrotensiones pero no la totalidad de las microtensiones existentes entre las diferentes fases del material. En el caso de la perlita trefilada, su microestructura es tan fina que incluso en los pequeños cupones de material siguen existiendo un gran número de láminas de ferrita y cementita que conservarán microtensiones entre ellas. Ante las dificultades experimentales, en el caso de los materiales monofásicos se puede calcular este valor de referencia, imponiendo la condición de autoequilibrio a los perfiles de tensiones residuales. No obstante, ese método no

puede utilizarse en nuestro caso, ya que la perlita trefilada es bifásica y el perfil de tensiones de la ferrita no tiene por qué cumplir las condiciones de autoequilibrio.

Un método interesante para al menos reducir este problema es el utilizado recientemente por Ruiz et al [7] en el que muestran que si bien el valor de la componente hidrostática de las tensiones es muy sensible al error en el valor de d_0 , la componente desviadora lo es mucho menos, por lo que proponen la obtención únicamente del perfil de tensiones desviadoras, que puede resultar suficiente, sobre todo a efectos de comparar la efectividad de diferentes tratamientos.

En resumen, el problema de qué método utilizar para hallar el valor de referencia d_0 en los materiales polifásicos sigue siendo uno de los grandes caballos de batalla en el mundo de las técnicas de difracción.

3.- La anisotropía de la perlita trefilada: el trefilado genera una importante textura de fibra [110] en la fase ferrita [7], lo cual puede provocar problemas en las medidas de difracción, debido a que supone una orientación preferente de los planos que difractan, pudiendo distorsionar los difractogramas. En los últimos años se ha realizado un trabajo importante para solucionar este problema [8].

Adicionalmente, fruto de la textura generada en la ferrita y del progresivo alineamiento de las láminas de cementita según la dirección de trefilado, el alambre trefilado tiene una importante anisotropía mecánica, con la dirección longitudinal más resistente que el resto, lo cual también genera inconvenientes a la hora de simular el proceso numéricamente [1]. Aún así, la mayoría de las simulaciones numéricas encontradas en la literatura no tienen en cuenta este factor, lo que, como veremos, puede llevar a errores significativos en la determinación de las tensiones.

4.- El pequeño diámetro de los alambres: Los alambres trefilados suelen ser muy finos, haciendo muy difícil obtener puntos suficientes de medida a lo largo de un diámetro. Los volúmenes de medida de los métodos de difracción de neutrones están en torno a 1mm^3 , lo cual permite obtener un perfil de tensiones en alambres de 5mm de diámetro como es el caso de los alambres utilizados en el hormigón pretensado [7] pero no así en los usados para el refuerzo de neumáticos (la industria más importante en el trefilado de alambres), donde las dimensiones de los alambres están por debajo de 1mm de diámetro.

5.- Tratamientos no axisimétricos: La mayoría de los alambres suelen someterse a tratamientos de enrollado y enderezado que rompen la simetría axial de las tensiones, ya que las tensiones residuales son muy sensibles a cualquier procesado posterior al trefilado [1]. Normalmente en un experimento realizado en una gran instalación científica se puede obtener el perfil de

tensiones a lo largo de uno o, a lo sumo, dos diámetros. En el caso de que los perfiles no tengan simetría axial, será necesario elegir convenientemente el diámetro de medida para interpretar la información obtenida.

6.- Las pequeñas dimensiones de las muestras: Frecuentemente, ya sea por las pequeñas dimensiones de los dispositivos portamuestras que hay en los difractómetros o por los propios componentes que van a ser investigados, las medidas experimentales se realizan sobre muestras diminutas que han sufrido un proceso de corte. Los autores han mostrado que dicho proceso de corte, al generar nuevas superficies libres de tensiones, afecta al estado de tensiones residuales por lo que para evitar que la preparación de la muestra afecte a la medida es necesario utilizar probetas suficientemente largas [9].

A pesar de estas dificultades, un número importante de estudios han arrojado resultados interesantes sobre las tensiones residuales en esta clase de alambres [8,10-16]. Se han medido tensiones residuales en la fase ferrita y se han realizado esfuerzos importantes, utilizando la difracción de rayos X, de neutrones y la radiación sincrotrón para medir en fase cementita llegando a obtener estimaciones del promedio global de tensiones en la cementita en la sección. No obstante, al inicio de esta investigación, una medida experimental de un perfil de tensiones residuales a lo largo de un diámetro de un alambre de acero perlítico trefilado no se había comparado nunca con los resultados de las simulaciones numéricas.

3. TENSIONES RESIDUALES EN ALAMBRES “DE LABORATORIO”

Dadas las dificultades expuestas, antes de emprender la caracterización de las tensiones residuales en alambres de pretensado trefilados industrialmente, consideramos la necesidad de realizar un importante esfuerzo para calibrar las técnicas experimentales y numéricas. Para ello se fabricaron de forma controlada dos alambres especiales: uno de ellos completamente ferrítico (una sola fase) y el otro perlítico (dos fases), de 20 mm de diámetro. Ambos se sometieron al paso a través de una matriz de trefilado de geometría conocida. El propósito de utilizar un alambre de tan grandes dimensiones y trefilarlo sólo a través de una matriz era permitir la obtención de suficientes puntos experimentales a lo largo de un diámetro para definir correctamente el perfil de tensiones y también intentar medir las tensiones en la cementita, al no haber sufrido el material una gran deformación. Además, para evitar cualquier cambio en las tensiones residuales, los alambres se mantuvieron rectos en todo momento. Los resultados principales de este trabajo se resumen a continuación:

3.1.- Alambres Ferríticos (una única fase)

Alambres rectos de 20 mm de diámetro y 6 metros de longitud de un acero completamente ferrítico (0.04%C) fueron trefilados en una pasada hasta un diámetro final

de 18 mm (reducción del 20% en área). Se midieron las tensiones residuales en los alambres trefilados por difracción de rayos X y neutrones. Las medidas de neutrones fueron realizadas por un equipo del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC) [17] en el reactor NFL-Studsvik en Suecia, con el difractómetro REST. Las medidas con rayos X se realizaron en el Depto de Ciencia de Materiales (UPM), con un analizador Rigaku Strainflex. En la referencia [17] se pueden encontrar detalles de estas medidas y de estas técnicas de difracción. El proceso de trefilado se simuló numéricamente mediante el método de los elementos finitos. Una descripción detallada del modelo aparece en la referencia [1]. Los datos iniciales para reproducir el trefilado fueron la curva tensión-deformación del material antes de trefilar y la geometría de la matriz de trefilado.

En la figura 1 se comparan las medidas experimentales de las tensiones residuales a diferentes profundidades con los valores del perfil de tensiones calculados por el método de elementos finitos a lo largo de un diámetro. Como se puede apreciar, los resultados de la simulación numérica se corresponden muy bien con las medidas experimentales por difracción de neutrones (en el interior del alambre) y por difracción de rayos X (en la superficie).

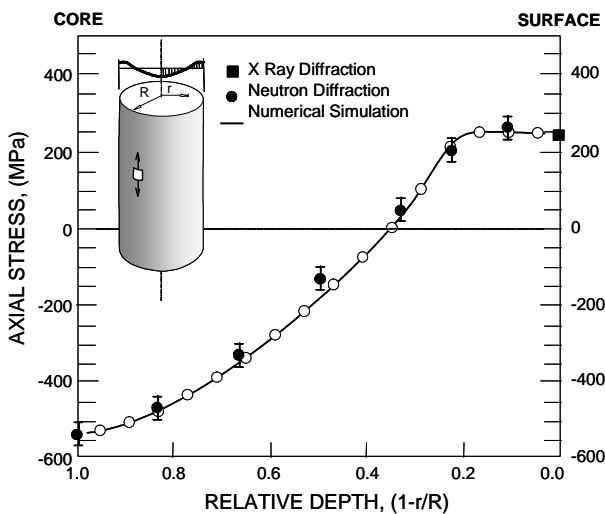


Figura 1. Perfil de tensiones residuales axiales a lo largo de un diámetro en el alambre ferrítico trefilado. Comparación entre las medidas con neutrones y rayos X y las simulaciones numéricas [17].

3.2.- Alambres Perlíticos (dos fases)

Alambres rectos (20 mm de diámetro y 6 m de longitud) de acero perlítico (0.75-0.80%C) fueron trefilados en un paso hasta un diámetro final de 18 mm (20% de reducción en área). Las tensiones residuales en la sección transversal del alambre trefilado se determinaron tanto en la fase ferrita como en la cementita. Para ello se realizaron medidas en el difractómetro de neutrones de REST (NFL-Studsvik,

Suecia) y también se utilizó la radiación sincrotrón de alta energía, llevándose a cabo las medidas en la línea ID15A del Sincrotrón ESRF (Grenoble, Francia). Más detalles se pueden encontrar en la referencia [18]. Las macro tensiones en el material perlítico se determinaron a partir de la regla de la mezclas utilizando las tensiones medidas experimentalmente en cada fase, corregidas con el porcentaje relativo de cada una (90% ferrita y 10% cementita). Los perfiles de tensiones en cada fase y de macro tensiones se muestran en la figura 2. Como se aprecia en la figura, aunque la fracción volumétrica de la cementita es pequeña, al representar la fase dura, sus tensiones son un orden de magnitud superior a las existentes en la ferrita, por lo que no se puede despreciar su contribución a las macro tensiones del material perlítico.

El modelo numérico utilizado para el material ferrítico se utilizó también para simular el trefilado en este caso. Cuando se compararon los resultados con los obtenidos experimentalmente, se comprobó que las predicciones numéricas eran buenas a la hora de predecir la forma del perfil de tensiones pero los valores de tensiones obtenidos sobrestimaban las tensiones reales. Para tratar de corregir esto se introdujo una corrección que tuviera en cuenta la anisotropía de la perlita trefilada [19], producida por el progresivo alineamiento de las láminas de cementita según la dirección de trefilado [20,21].

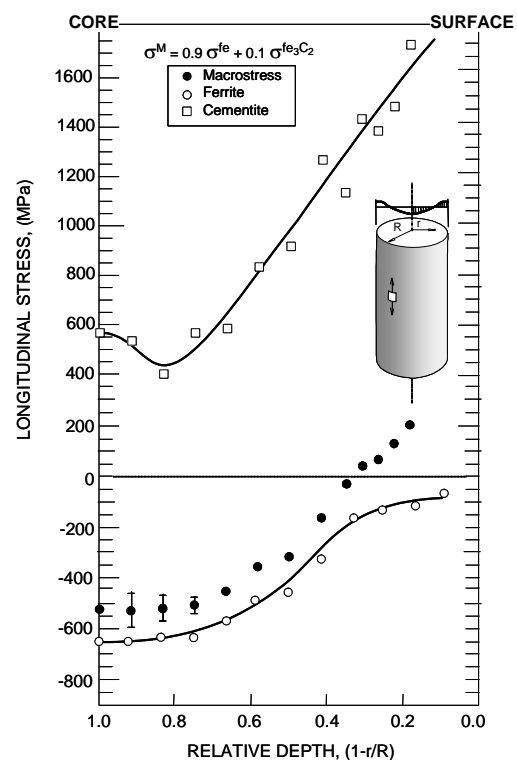


Figura 2. Perfil de tensiones residuales axiales en ferrita y cementita a lo largo de un diámetro en el alambre perlítico trefilado. Las macro tensiones en el material perlítico se han determinado a partir de las tensiones medidas en cada fase utilizando la regla de las mezclas (90% ferrita y 10% cementita)[18].

Los resultados experimentales y los de la simulación numérica por elementos finitos para las macro tensiones residuales se comparan en la figura 3, mostrando una buena correspondencia. También se muestran en dicha figura los resultados de la simulación numérica con el modelo de elementos finitos isótropo que, como se puede apreciar, sobrestimaba el perfil de tensiones residuales. Así pues, tener en cuenta la anisotropía generada en los alambres por el trefilado no varía la forma de los perfiles de tensiones residuales, pero sí los valores obtenidos de las tensiones. Ésta es la primera vez en que el perfil de tensiones residuales a lo largo de un diámetro se compara entre medidas experimentales y simulaciones numéricas para esta clase de material [19].

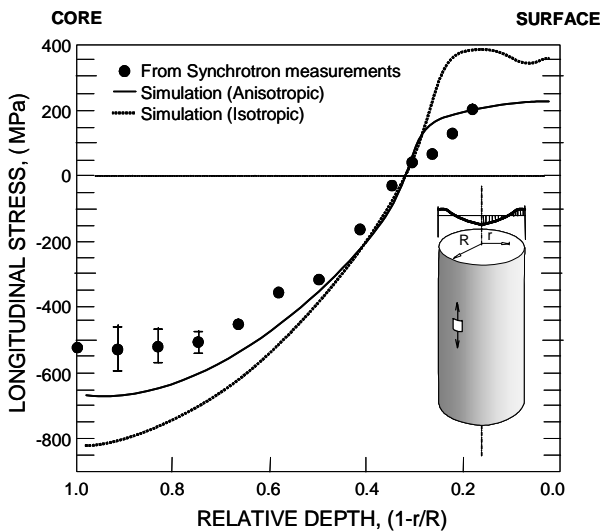


Figura 3. Perfil de macro tensiones residuales a lo largo de un diámetro en el alambre perlítico trefilado [19]. Comparación entre las medidas experimentales y los resultados del modelo numérico isótropo y anisótropo.

4. TENSIONES RESIDUALES EN ALAMBRES INDUSTRIALES

Una vez calibrados los métodos y exploradas las posibilidades de las técnicas de difracción para la caracterización de las tensiones residuales en los alambres perlíticos, el gran reto era la caracterización de las tensiones residuales en alambres industriales (que han pasado por 7 o más matrices de trefilado). A lo largo de este trabajo se han realizado medidas experimentales y simulaciones numéricas sobre un número considerable alambres con diferentes perfiles de tensiones residuales, que han permitido estudiar la influencia de las mismas en las propiedades mecánicas finales de los alambres. Este aspecto del trabajo será resumido en la segunda parte de este artículo. Los resultados obtenidos con las técnicas de difracción han sido fundamentales para la realización del estudio y, como esperábamos, nos han permitido detectar todos los efectos que se pretendía poner de manifiesto, pero también hay que señalar que, en todo momento, nos tuvimos que enfrentar a dos grandes problemas, ya comentados, que resultan difíciles de solventar y complican la interpretación de los resultados:

- Con los medios actuales resulta casi imposible obtener un perfil de espaciados interplanares en la fase cementita. En otras palabras, hoy en día no se pueden medir experimentalmente las tensiones residuales en la fase cementita en alambres tan finos y tan “trabajados”.
- La obtención precisa del valor de referencia d_0 para la ferrita sigue siendo un problema sin resolver en las técnicas de difracción.

En estas condiciones parece que a lo que se puede aspirar con los métodos de difracción es a dar un perfil preciso de tensiones desviadoras en la fase ferrita. En el caso de que estemos comparando la efectividad de distintos tratamientos sobre un mismo material, dicho perfil ofrece una información muy interesante [7]. No obstante, es difícil convencer a la industria de que esto resuelve el problema. No hay que olvidarse que en el caso de los alambres de pretensado, las tensiones residuales no son importantes en sí mismas, sino en la medida en que se suman a las tensiones de servicio para determinar tensiones finales que va a estar aguantando el material en su vida en servicio. Desde ese punto de vista, la industria está demandando el perfil de macro tensiones residuales y, si fuera posible, que fuéramos capaces de predecir ese perfil final de tensiones en servicio.

Uno de los aspectos en que más ha evolucionado el equipamiento de los difractómetros para medida de tensiones residuales en los últimos años ha sido en la disponibilidad de máquinas que permiten simular procesos de carga en las muestras mientras se miden las tensiones. En opinión de los autores, estas técnicas pueden ser aprovechadas para solventar algunas de las limitaciones de los métodos de difracción actuales, al permitir obtener relaciones entre las macro tensiones producidas al someter a la probeta a una carga conocida y lo que realmente se puede medir en las técnicas de difracción, que es el incremento de la distancia interplanar en la ferrita.

Una de las grandes preocupaciones de estos investigadores ha sido buscar una forma de estimar el perfil de macro tensiones residuales a partir de los datos medibles en la actualidad, para de esta forma ser capaces de responder al problema de partida: cuáles son las tensiones que aguantará en servicio la armadura. Recientemente, los autores [22] han propuesto un método para obtener las macro tensiones residuales a partir del perfil de espaciados interplanares medidos en la fase ferrita a lo largo de un diámetro, sin necesidad de conocer el perfil de la cementita ni asumir ningún d_0 en la ferrita. Más aún, el método permite también estimar los perfiles de tensiones en servicio, que es el dato fundamental para los alambres de pretensado.

Como se ha mostrado, a pesar de sus limitaciones, los métodos de difracción son los más poderosos para afrontar la medida de tensiones residuales y una herramienta muy útil para la optimización del procesamiento de los alambres [23].

5. CONCLUSIONES

El conocimiento y control del perfil de tensiones residuales es una herramienta fundamental para optimizar el procesado y las propiedades de los alambres de pretensado. Hoy en día se dispone de técnicas poderosas para afrontar este problema, tanto desde el punto de vista numérico como experimental, pero para una interpretación correcta de los resultados es necesario ser consciente de sus dificultades y limitaciones. Este artículo ha tratado de resumir la experiencia de los autores en este campo, fruto del intenso trabajo desarrollado en los últimos años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento al apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto FEDER UPM 00.33.004) y al Ministerio de Fomento (proyecto "Durabilidad de armaduras activas en estructuras de hormigón pretensado"). También desean mostrar su gratitud a D. Luis del Pozo, de EMESA TREFILERÍA S.A., por su ayuda y sus útiles comentarios y, en especial, a los profesores F. Mompeán, M. García Hernández, M. Martínez (ICMM) por su ayuda con las medidas por difracción.

REFERENCIAS

- [1] Atienza, J.M., "Residual stresses in cold drawn steel wires". PhD Thesis, 230 pages, UPM, Spain, 2001.
- [2] Elices, M., "Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires," *Journal of Materials Science*, 39(12), pp 3889-3899, 2004.
- [3] J. Llorca and V. Sánchez-Gálvez, "Fatigue limit and fatigue life prediction in high strength cold drawn eutectoid steel wires", *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, 12, pp 31-45, 1989.
- [4] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, L. Caballero, and M. Elices, "Residual stresses and stress corrosion in cold drawn eutectoid steel wires," *Wire Journal International*, pag. 53-57, june 2007.
- [5] I.C. Noyan and J.B. Cohen, *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1987.
- [6] P.J. Withers and H.K.D.H. Bhadeshia, "Residual stress. Part 1-Measurement techniques", *Materials Science and Technology*, 176, pp 355-365, 2001.
- [7] Ruiz-Hervias, J., Luzin, V., Prask, H., Gnaeupel-Herold, T., Elices, M. "Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods." *Material Science and Engineering*, vol. 435-436, pp. 725-735, 2006.
- [8] K. Van Acker, J. Root, P. Van Houtte and E. Aernoudt, "Neutron diffraction measurement of the residual stress in the cementite and ferrite phases of cold drawn steel wires", *Acta Materialia*, 44, pp 4039-4049, 1996.
- [9] Ruiz, J, Atienza JM, Elices M. "Residual stresses in wires: influence of wire length". *Journal of Materials Engineering and Performance* vol 12, n°4, pp 480-489, 2003.
- [10] E.C. Oliver, M.R. Daymond and P.J. Withers, "Interphase and intergranular stress generation in carbon steels", *Acta Materialia*, 52, pp 1937-1951, 2004.
- [11] P.F. Willemse, B.P. Naughton and C.A. Verbraak, "X-ray residual stress measurement on cold drawn steel wire", *Material Science and Engineering*, 56, pp 25-37, 1982.
- [12] P. Renz, W. Steuff and R. Kopp, "Possibilities of influencing residual stresses in drawn wires and bars", *Wire Journal International*, pp. 64-69, January 1996.
- [13] J. Gerhardt, and A.E. Tekkaya, "Applications of the finite element method on the determination of the residual stresses in drawing and extrusion", *Computational Plasticity*, pp. 1037-1050, Barcelona 1997.
- [14] K. Sawamiphakdi, P.K. Kropp and G.D. Lahoti, "Investigation of residual stresses in drawn wire by the finite element method", *Journal Engineering Materials & Technology*, 112, pp 231-235, 1990.
- [15] R. Wintholz and J.B. Cohen, "Load sharing of the phases in 1080 steel during low-cycle fatigue", *Metallurgical Transactions 23A*, pp 341-354, 1992.
- [16] M.R. Daymond and H.G. Priesmeyer, "Elastoplastic deformation of ferritic steel and cementite studied by neutron diffraction and self-consistent modeling", *Acta Materialia*, 50, pp1613-1626, 2001.
- [17] J.M. Atienza, M.L. Martinez-Perez, J. Ruiz-Hervias, F.J. Mompean, M. Garcia-Hernandez and M. Elices, "Residual stresses in cold drawn ferritic rods", *Scripta Materialia*, 52, pp 305-309, 2005.
- [18] M.L. Martinez-Perez, F.J. Mompean, J. Ruiz-Hervias, C.R. Borlado, J.M. Atienza, M. García-Hernandez, M. Elices, J. Gil Sevillano, Ru Lin Peng and T. Buslaps, "Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction", *Acta Materialia*, 52, pp 5303-5313, 2004.
- [19] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, M.L. Martínez-Perez, F.J. Mompeán, M. García-Hernandez and M. Elices, "Residual stresses in cold drawn pearlitic rods", *Scripta Materialia*, 52, pp 1223-1228, 2005.
- [20] J. Gil Sevillano, "Room temperature plastic deformation of pearlitic cementite", *Material Science & Engineering*, 21, pp 221-225, 1975.
- [21] J. Gil Sevillano, P. Van Houtte and E. Aernoudt, "Plastic anisotropy of pearlitic ferrite", In *Proceedings ICOTOM 5*, Gotstein G, Lücke K. Eds Springer Verlag, II, pp 495-504, 1978.
- [22] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, M. Elices, E.C. Oliver. "Residual and service macrostresses in cold drawn eutectoid steel wires". *Material Science & Engineering*, enviado.
- [23] J. Ruiz-Hervias, J.M. Atienza, M. Elices and E.C. Oliver, "Optimisation of post-drawing treatments by means of neutron diffraction", *Materials Science and Engineering*, in press 2007.